

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



REC'D 07 JAN 2004

WIPO PCT

Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

Aktenzeichen: 102 53 784.4

Anmeldetag: 19. November 2002

Anmelder/Inhaber: Universität zu Lübeck, Lübeck/DE

Bezeichnung: Verfahren zur Bildregistrierung

IPC: G 6 T 5/50

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 11. Dezember 2003
Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag



Agurks

Verfahren zur Bildregistrierung



Die Erfindung betrifft ein Verfahren zu Bildregistrierung, also zur Korrektur von geometrischen Differenzen in unterschiedlichen Darstellungen eines Objektes. Diese Verfahren spielen z.B. in der Medizintechnik und insbesondere bei der Analyse von Gewebeveränderungen im Rahmen der Krebsfrüherkennung eine wichtige Rolle.

Es sind bereits Verfahren bekannt, die eine Bildregistrierung aufgrund eines Distanzkriteriums durchführen (Lisa Gottesfeld Brown: A survey of image registration techniques. ACM Computing Surveys, 24(4): 325-376, 1992, Jan Modersitzki: Numerical Methods for Image Registration. Habilitation, Institute of Mathematics, University of Lübeck, Germany, 2002).

Die allgemeine Methodik basiert auf der Optimierung einer anwendungskonform zu wählenden Zielfunktion, die typischerweise auf Bildintensitäten basiert. Bei derartigen Verfahren werden außer der Bildinformation keine weiteren Kenntnisse zur Registrierung herangezogen. Das Ergebnis der Registrierung ist nur im Sinne einer globalen Mittelung optimal. Kommen in einer Anwendung speziellen, charakteristischen Punkten (wie z.B. in medizintechnischen Anwendungen den sogenannten anatomischen Landmarken) eine besondere Bedeutung zu, sind diese Verfahren also nicht empfehlenswert.

Neben der Bildregistrierung auf der Basis eines Distanzkriteriums sind auch Verfahren bekannt, die die Bildregistrierung ausschließlich auf der Basis von Kontrollpunkten durchführen (Karl Rohr: Landmark-based Image Analysis. Computational Imaging and Vision. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001). Bei diesen Verfahren werden den zu registrierenden Ansichten prospektiv oder retrospektiv korrespondierende Kontrollpunkte assoziiert, die dann mittels Registrierung zum Abgleich gebracht werden. Der Nachteil dieser Verfahren besteht darin, dass die Registrierung ausschließlich Kontrollpunkte berücksichtigt. Weitere Bildinformationen wie z.B. Bildintensitäten können bei diesen Verfahren nicht berücksichtigt werden. Bei unbefriedigenden Registrierungsergebnissen kann ein Anwender nur versuchen, das Ergebnis durch geschicktes Einfügen weiterer Kontrollpunkte zu verbessern. Das Einfügen weiterer Kontrollpunkte basiert auf subjektivem Ausprobieren. Hierzu gibt es keine Richtlinien und insbesondere kein automatisiertes Vorgehen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Bildregistrierung zu entwickeln, das zu einer perfekten, garantierbaren Korrespondenz einer Anzahl vorgegebener Kontrollpunkte führt, als auch zu einem im Sinne des Distanzkriterium optimalen Ergebnis.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch iterative Bestimmung einer hinsichtlich eines vorgegebenen Distanz- und Glattheitskriteriums optimalen Transformation, bei dem in den Bildern korrespondierende Kontrollpunkte garantierbar aufeinander abgebildet werden, durch (1) Initialisieren eines Iterationszählers und des initialen Verrückungsfeldes, (2) Bestimmen der numerischen Lösungen der nicht-linearen partiellen Differentialgleichung (PDE) mit dem aus einem vorgegebenen Glattheitskriterium ableitbarem Differentialoperator und den an vorgegebenen Kontrollpunkten lokalisierten Punktauswertefunktionalen, (3) Zusammenfassen der Interpolationsbedingungen, (4) Berechnen einer speziellen numerischen Lösung der PDE mit der auf der Basis des Distanzkriteriums und des aktuellen Verrückungsfeldes bestimmten Kraft und dem aus dem Glattheitskriterium abgeleiteten Differentialoperator, (5) Auswerten der speziellen Lösung an den Kontrollpunkten, (6) Bestimmen der Koeffizienten zur Berechnung einer aktualisierten Verrückung, (7) Aufdatieren des Verrückungsfelds und Erhöhen des Iterationszählers, (8) Überprüfen der Verrückung auf Konvergenz und (9) bei Nichterfüllen des Konvergenzkriteriums erneutes Durchlauf der Schritte (4) bis (8).

Der Verfahrensablauf wird durch das Flussdiagramm der Figur 1 beschreibend abgebildet.

Zur Vereinfachung bezeichnen wir eine Ansicht als Referenzbild (Referenz R) und eine weitere, zu korrigierende Ansicht als Template (Template T). Formal handelt es sich hierbei um Funktionen eines d -dimensionalen reellen Raumes bzw. einer Teilmenge $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ in die Menge der reellen Zahlen. Jedem d -dimensionalen Punkt $x \in \Omega$ wird also durch $R(x)$ und $T(x)$ ein Wert zugewiesen, der z.B. als Farb- oder als Grauwert interpretiert werden kann.

In praktischen Anwendungen – insbesondere bei jeder Programmierung des hier erläuterten Verfahrens – können Referenz und Template in diskreter Form vorliegen. Die Bilder sind dann Funktionen auf einem Gitter (z.B. $\Omega = \{1, \dots, n_1\} \times \{1, \dots, n_2\}$ für die Dimension $d = 2$) in eine diskrete Menge (z.B. in die Menge $\{0, \dots, 255\}$) und können als aus Pixeln aufgebaut interpretiert werden. Für das Registrierungsverfahren sind diese Einschränkungen und insbesondere die konkrete Art der Diskretisierung unerheblich und unwesentlich. Die Einschrän-

kungen werden lediglich zum Zwecke einer vereinfachten Beschreibung vorgenommen. Das Verfahren lässt sich analog auf beliebige d -dimensionale Datensätze anwenden.

Die Aufgabe der Bildregistrierung besteht in der Bestimmung einer Verrückungsfunktion u , so dass die Forderung $R(x) = T_u(x)$ mit der Abkürzung $T_u(x) := T(x - u(x))$ für alle $x \in \Omega$ möglichst gut erfüllt wird. Zur Berechnung des durch u deformierten Templates T_u wird bei diskret vorgegebenen Bildern wie in der Bildverarbeitung allgemein üblich eine Interpolation (z.B. d -linear) durchzuführen sein, da die verrückten Koordinaten $x - u(x)$ nicht notwendig auch auf dem diskreten Gitter liegen müssen. Wie eine solche Interpolation erfolgt, ist für das Registrierungsverfahren nicht wesentlich.

Über die oben formulierte Ähnlichkeit hinaus müssen sowohl Forderungen an die Glattheit der Verrückung gestellt werden sowie an Abbildungseigenschaften in Bezug auf eine Anzahl von vorab gewählten Kontrollpunkten. Im einfachsten Fall sollen die Koordinaten jedes der m Kontrollpunkte $K^{T,j}$ des Templates auf den jeweils korrespondierenden Kontrollpunkt $K^{R,j}$ der Referenz abgebildet werden, $j = 1, \dots, m$. Stimmen die Koordinaten der Kontrollpunkte bereits überein, was ggf. durch eine Vorregistrierung gewährleistet werden kann, so gilt also $u = 0$ in diesen Punkten.

Wie bei Optimierungsproblemen üblich kann die Bestimmung eines Minimierers des oben genannten Distanzkriteriums mittels eines Gradientenabstiegsverfahren in iterativer Weise erfolgen. Im Prinzip kann hierbei jedes beliebige Distanzkriterium gewählt werden. Die den gängigen Distanzkriterien assoziierten Kräfte finden sich in der Literatur (Modersitzki 2002). Die konkrete Art der Berechnung dieser Kräfte ist für das Registrierungsverfahren jedoch nicht wesentlich.

Als Glattheitskriterium kann wiederum prinzipiell jedes aus der Literatur bekannte Funktional genutzt werden. Aus dem Glattheitskriterium lässt sich ein partieller Differentialoperator A ableiten. Für die in der Literatur verwendeten Kriterien sind diese Operatoren bekannt (Modersitzki 2002). Die gesuchte Verrückung u lässt sich dann als Lösung einer nicht-linearen partiellen Differentialgleichung (PDE) charakterisieren.

Zur Bestimmung einer numerischen Lösung dieser PDE verwenden wir eine finite Differenzen Approximation des Differentialoperators, die dann auf ein Gleichungssystem für die Git-

terwerte der Verrückung führt. Die konkrete Diskretisierung der Differentialgleichung ist jedoch für das Registrerungsverfahren ohne Bedeutung.

Diese Vorgehensweise deckt sich mit dem Verfahren für die ausschließlich auf dem Distanzkriterium und dem Glattheitskriterium basierende Methode. Der neue Aspekt besteht in einer geeigneten Einbindung der vorgegebenen Kontrollpunkte in die Berechnung der Verrückung, bei der eine Korrespondenz der Kontrollpunkte garantiert werden kann. Da bereits Verfahren zur Bestimmung der Verrückung auf der Basis des Distanz- und des Glattheitskriteriums bekannt sind, geben wir ein Verfahren an, welches Teillösungen in geeigneter Weise zu einer Gesamtlösung kombiniert, z.B. als

$$u_\ell(x) = v_\ell^0(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_j^\ell v_j^j(x), \quad x \in \Omega, \quad \ell = 1, \dots, d.$$

Bezeichnet A den zum Glattheitsterm gehörigen Differentialoperator und f das zum Distanzkriterium gehörige Kraftfeld, dann ist v^0 eine numerische Lösung von $Av^0 = -f$, die Funktionen v^j sind numerische Lösungen der distributionellen PDE $Av^j = \delta^j$, $j = 1, \dots, m$ wobei δ^j das Punktauswertefunktional (Dirac-Stoß) lokalisiert am Kontrollpunkt $K^{T,j}$ bezeichnet. Die konkrete numerische Methode für die Lösung der PDE ist für das Registrerungsverfahren unerheblich.

Aus mathematischer Sicht sind die v^j , $j = 1, \dots, m$ Greensche Funktionen des Differentialoperators A , die eine Lösung der PDE bei vorgegebener Einzelpunktverrückung darstellen. Eine geeignete Linearkombination dieser Greenschen Funktionen stellt daher sicher, dass bei dem Gesamtverfahren alle Kontrollpunkte wie gefordert aufeinander abgebildet werden.

Die Funktion v^0 wird über ein iteratives Verfahren so bestimmt, dass das Distanzkriterium unter Einhaltung der geforderten Glattheit minimiert wird. Die Gewichtsfaktoren λ_j^ℓ werden dabei so angepasst, dass die Kontrollpunkte in der geforderten Weise abgebildet werden.

Die Initialisierung des Programms erfordert die Wahl eines Distanz- und eines Glattheitskriteriums bzw. der aus diesen Kriterien ableitbaren Kraft und des Differentialoperators. Auf der Basis der an den Kontrollpunkten lokalisierten Punktauswertefunktionale können dann die Greenschen Funktionen v^j , $j = 1, \dots, m$ mit einem numerischen Verfahren bestimmt werden. Diese werden im weiteren Verlauf des Verfahrens nicht mehr geändert.

Der erfindungsgemäß Initialisierung folgt eine gängige Iterationsprozedur, in deren Verlauf ein Gradientenabstieg unter Berücksichtigung der Kontrollpunkte durchgeführt wird. Menschliches Eingreifen ist nicht von Nöten. Das beschriebene Verfahren kombiniert also die Vorteile der auf Distanzkriterien basierenden Methoden (also insbesondere die Automatisierbarkeit und eine im Mittel optimale Registrierung) mit denen des Kontrollpunktverfahrens (garantierte Registrierung ausgezeichneter Punkte) und liefert bei Vorgabe eines initialen Satzes von Kontrollpunkten reproduzierbare, optimale Ergebnisse unabhängig vom Anwender bzw. Computerprogramm. Die Details des Computercodes spielen für das Endergebnis der Bildregistrierung keine wesentliche Rolle und beeinflussen nur die benötigte Rechenzeit und die Speicheranforderungen.

Ansprüche

1. Verfahren zur Registrierung von Bildern durch iterative Bestimmung einer hinsichtlich eines vorgegebenen Distanz- und Glattheitskriteriums optimalen Transformation,

dadurch gekennzeichnet, dass

in den Bildern korrespondierende Kontrollpunkte garantierbar aufeinander abgebildet werden,
durch

- (1) Initialisieren eines Iterationszählers und des initialen Verrückungsfeldes,
- (2) Bestimmen der numerischen Lösungen der nicht-linearen partiellen Differentialgleichung (PDE) mit dem aus einem vorgegebenen Glattheitskriterium ableitbarem Differentialoperator und den an vorgegebenen Kontrollpunkten lokalisierten Punktauswertefunktionalen,
- (3) Zusammenfassen der Interpolationsbedingungen,
- (4) Berechnen einer speziellen numerischen Lösung der PDE mit der auf der Basis des Distanzkriteriums und des aktuellen Verrückungsfeldes bestimmten Kraft und dem aus dem Glattheitskriterium abgeleiteten Differentialoperator,
- (5) Auswerten der speziellen Lösung an den Kontrollpunkten,
- (6) Bestimmen der Koeffizienten zur Berechnung einer aktualisierten Verrückung,
- (7) Aufdatieren des Verrückungsfelds und Erhöhen des Iterationszählers,
- (8) Überprüfen der Verrückung auf Konvergenz und
- (9) bei Nichterfüllen des Konvergenzkriteriums erneuten Durchlauf der Schritte (4) bis (8).

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei den zu registrierenden Bildern um digitale Bilder, Pixel, JPEG, wavelet basierte Objekte oder akustische Signale handelt.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein- zwei- oder drei-dimensionale sowie Sequenzen von ein-, zwei- und drei-dimensionalen Objekten registriert werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Kontrollpunkte anatomische Landmarken, fiducial marker oder andere charakteristische Kenngrößen darstellen.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Kontrollpunkte manuell, halb-automatisch oder voll-automatisch eingegeben werden.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Distanzkriterium intensitäts-, Kanten-, Ecken-, Oberflächennormalen- oder Level-Set basiert oder auf der Sum of Squared Differences, L_2 -Distanz, Korrelation, Varianten der Korrelation, Mutual-Information oder Varianten der Mutual-Information beruht.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die dem Distanzmaß assoziierten Kraftterme über finite Differenzen Verfahren oder Gradientenbildung berechnet werden.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das verwendete Glattheitskriterium über ein elastisches Potential oder einen fluidalen Ansatz physikalisch motiviert oder über Diffusive- oder Curvature-Ansätze auf zeitlichen oder räumlichen Ableitungen der Verrückung basiert.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Randbedingungen des Differentialoperators explizite oder implizite, Neumann-, Dirichlet-, sliding-, bending- oder periodische Randbedingungen sind.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Art der Diskretisierung des Differentialoperators auf finiten Differenzen, finiten Volumen, finiten Elementen, Fourier-Methoden, Reihenentwicklung, Filtertechniken, Kollokationen oder Multigrid beruht.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Interpolation d -dimensional über Splines oder Wavelets durchgeführt wird.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Verrückung explizit, über das Inkrement der Verrückung oder deren Zeitableitung aufdatiert wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass für das Verfahren ein Referenzkoordinatensystem verwendet wird, das durch Euler- bzw. Lagrange Koordinaten abgebildet wird.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die in dem Verfahren auftretenden linearen Gleichungssysteme direkt, indirekt, iterativ oder mittels Multigrid gelöst werden.

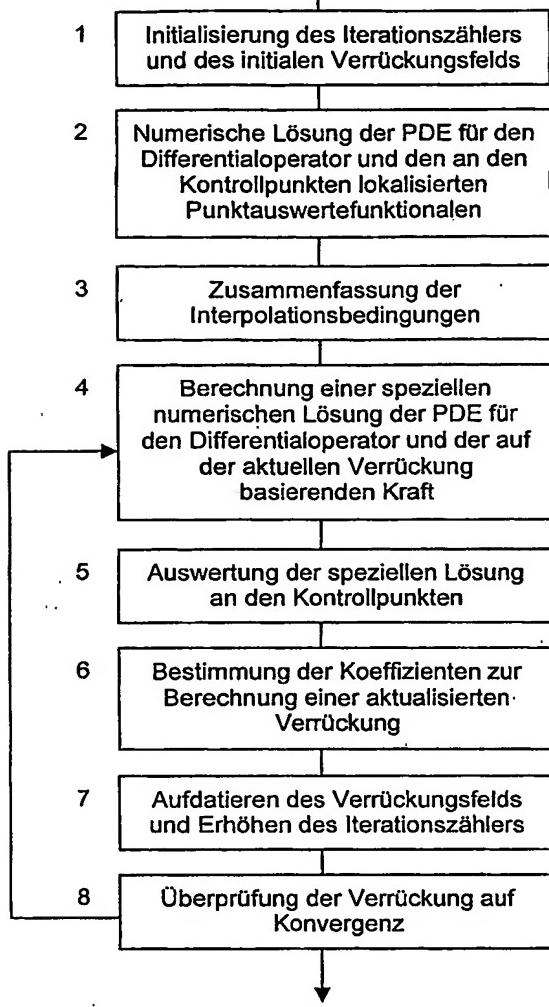


Fig. 1

Zusammenfassung

Verfahren zur Bildregistrierung durch iterative Bestimmung einer hinsichtlich eines vorgegebenen Distanz- und Glattheitskriteriums optimalen Transformation, bei dem in den Bildern korrespondierende Kontrollpunkte garantierbar aufeinander abgebildet werden, durch (1) Initialisieren eines Iterationszählers und des initialen Verrückungsfeldes, (2) Bestimmen der numerischen Lösungen der nicht-linearen partiellen Differentialgleichung (PDE) mit dem aus einem vorgegebenen Glattheitskriterium ableitbarem Differentialoperator und den an vorgegebenen Kontrollpunkten lokalisierten Punktauswertefunktionalen, (3) Zusammenfassen der Interpolationsbedingungen, (4) Berechnen einer speziellen numerischen Lösung der PDE mit der auf der Basis des Distanzkriteriums und des aktuellen Verrücksfeldes bestimmten Kraft und dem aus dem Glattheitskriterium abgeleiteten Differentialoperator, (5) Auswerten der speziellen Lösung an den Kontrollpunkten, (6) Bestimmen der Koeffizienten zur Berechnung einer aktualisierten Verrückung, (7) Aufdatieren des Verrückungsfelds und Erhöhen des Iterationszählers, (8) Überprüfen der Verrückung auf Konvergenz und (9) bei Nichterfüllen des Konvergenzkriteriums erneutes Durchlauf der Schritte (4) bis (8).

Verfahren zur Bildregistrierung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bildregistrierung, also zur Korrektur von geometrischen Differenzen in unterschiedlichen Darstellungen eines Objektes. Diese Verfahren spielen z.B. in der Medizintechnik und insbesondere bei der Analyse von Gewebeveränderungen im Rahmen der Krebsfrüherkennung eine wichtige Rolle.

Es sind bereits Verfahren bekannt, die eine Bildregistrierung aufgrund eines Distanzkriteriums durchführen (Lisa Gottesfeld Brown: *A survey of image registration techniques*, ACM Computing Surveys, 24(4): 325-376, 1992, Jan Modersitzki: *Numerical Methods for Image Registration*, Habilitation, Institute of Mathematics; University of Lübeck, Germany, 2002). Die allgemeine Methodik basiert auf der Optimierung einer anwendungskonform zu wählenden Zielfunktion, die typischerweise auf Bildintensitäten basiert. Bei derartigen Verfahren werden außer der Bildinformation keine weiteren Kenntnisse zur Registrierung herangezogen. Das Ergebnis der Registrierung ist nur im Sinne einer globalen Mittelung optimal. Kommen in einer Anwendung speziellen, charakteristischen Punkten (wie z.B. in medizintechnischen Anwendungen den sogenannten anatomischen Landmarken) eine besondere Bedeutung zu, sind diese Verfahren also nicht empfehlenswert.

Neben der Bildregistrierung auf der Basis eines Distanzkriteriums sind auch Verfahren bekannt, die die Bildregistrierung ausschließlich auf der Basis von Kontrollpunkten durchführen (Karl Rohr: *Landmark-based Image Analysis. Computational Imaging and Vision*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001). Bei diesen Verfahren werden den zu registrierenden Ansichten prospektiv oder retrospektiv korrespondierende Kontrollpunkte assoziiert, die dann mittels Registrierung zum Abgleich gebracht werden. Der Nachteil dieser Verfahren besteht darin, dass die Registrierung ausschließlich Kontrollpunkte berücksichtigt. Weitere Bildinformationen wie z.B. Bildintensitäten können bei diesen Verfahren nicht berücksichtigt werden. Bei unbefriedigenden Registrierungsergebnissen kann ein Anwender nur versuchen, das Ergebnis durch geschicktes Einfügen weiterer Kontrollpunkte zu verbessern. Das Einfügen weiterer Kontrollpunkte basiert auf subjektivem Ausprobieren. Hierzu gibt es keine Richtlinien und insbesondere kein automatisiertes Vorgehen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Bildregistrierung zu entwickeln, das sowohl zu einer perfekten, garantierbaren Korrespondenz einer Anzahl vorgegebener Kontrollpunkte führt, als auch zu einem im Sinne des Distanzkriterium optimalen Ergebnis.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch iterative Bestimmung einer hinsichtlich eines vorgegebenen Distanz- und Glattheitskriteriums optimalen Transformation, bei dem in den Bildern korrespondierende Kontrollpunkte garantierbar aufeinander abgebildet werden, durch (1.) Initialisieren eines Iterationszählers und des initialen Verrückungsfeldes, (2.) Bestimmen der numerischen Lösungen der nicht-linearen partiellen Differentialgleichung (PDE) mit dem aus einem vorgegebenen Glattheitskriterium ableitbarem Differentialoperator und den an vorgegebenen Kontrollpunkten lokalisierten Punkt auswertefunktionalen, (3.) Zusammenfassen der Interpolationsbedingungen, (4.) Berechnen einer speziellen numerischen Lösung der PDE mit der auf der Basis des Distanzkriteriums und des aktuellen Verrückungsfeldes bestimmten Kraft und dem aus dem Glattheitskriterium abgeleiteten Differentialoperator, (5.) Auswerten der speziellen Lösung an den Kontrollpunkten, (6.) Bestimmen der Koeffizienten zur Berechnung einer aktualisierten Verrückung, (7.) Aufdatieren des Verrückungsfelds und Erhöhen des Iterationszählers, (8.) Überprüfen der Verrückung auf Konvergenz und (9.) bei Nichterfüllen des Konvergenzkriteriums erneutes Durchlaufen der Schritte (4.) bis (8.).

Der Verfahrensablauf wird durch das Flußdiagramm der Figur 1 beschreibend abgebildet.

Zur Vereinfachung bezeichnen wir eine Ansicht als Referenzbild (Referenz R) und eine weitere, zu korrigierende Ansicht als Template (Template T). Formal handelt es sich hierbei um Funktionen eines d -dimensionalen reellen Raumes bzw. einer Teilmenge $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ in die Menge der reellen Zahlen. Jedem d -dimensionalen Punkt $x \in \Omega$ wird also durch $R(x)$ und $T(x)$ ein Wert zugewiesen, der z.B. als Farb- oder als Grauwert interpretiert werden kann.

In praktischen Anwendungen – insbesondere bei jeder Programmierung des hier erläuterten Verfahrens – können Referenz und Template in diskreter Form vorliegen. Die Bilder sind dann Funktionen auf einem Gitter (z.B. $\Omega = \{1, \dots, n_1\} \times \{1, \dots, n_2\}$) für die Dimension $d = 2$) in eine diskrete Menge (z.B. in die Menge $\{0, \dots, 255\}$) und können als aus Pixeln

aufgebaut interpretiert werden. Für das Registrierungsverfahren sind diese Einschränkungen und insbesondere die konkrete Art der Diskretisierung unerheblich und unwesentlich. Die Einschränkungen werden lediglich zum Zwecke einer vereinfachten Beschreibung vorgenommen. Das Verfahren lässt sich analog auf beliebige d -dimensionale Datensätze anwenden.

Die Aufgabe der Bildregistrierung besteht in der Bestimmung einer Verrückungsfunktion u , so dass die Forderung $R(x) = T_u(x)$ mit der Abkürzung $T_u(x) := T(x - u(x))$ für alle $x \in \Omega$ möglichst gut erfüllt wird. Zur Berechnung des durch u deformierten Templates T_u wird bei diskret vorgegebenen Bildern wie in der Bildverarbeitung allgemein üblich eine Interpolation (z.B. d -linear) durchzuführen sein, da die verrückten Koordinaten $x - u(x)$ nicht notwendig auch auf dem diskreten Gitter liegen müssen. Wie eine solche Interpolation erfolgt, ist für das Registrierungsverfahren nicht wesentlich.

Über die oben formulierte Ähnlichkeit hinaus müssen sowohl Forderungen an die Glattheit der Verrückung gestellt werden sowie an Abbildungseigenschaften in Bezug auf eine Anzahl von vorab gewählten Kontrollpunkten. Im einfachsten Fall sollen die Koordinaten jedes der m Kontrollpunkte $K^{T,j}$ des Templates auf den jeweils korrespondierenden Kontrollpunkt $K^{R,j}$ der Referenz abgebildet werden, $j = 1, \dots, m$. Stimmen die Koordinaten der Kontrollpunkte bereits überein, was ggf. durch eine Vorregistrierung gewährleistet werden kann, so gilt also $u = 0$ in diesen Punkten.

Wie bei Optimierungsproblemen üblich kann die Bestimmung eines Minimierers des oben genannten Distanzkriteriums mittels eines Gradientenabstiegsverfahren in iterativer Weise erfolgen. Im Prinzip kann hierbei jedes beliebige Distanzkriterium gewählt werden. Die den gängigen Distanzkriterien assoziierten Kräfte finden sich in der Literatur (Modersitzki 2002). Die konkrete Art der Berechnung dieser Kräfte ist für das Registrierungsverfahren jedoch nicht wesentlich.

Als Glattheitskriterium kann wiederum prinzipiell jedes aus der Literatur bekannte Funktional genutzt werden. Aus dem Glattheitskriterium lässt sich ein partieller Differentialoperator A ableiten. Für die in der Literatur verwendeten Kriterien sind diese Operatoren bekannt (Modersitzki 2002). Die gesuchte Verrückung u lässt sich dann als Lösung einer nicht-linearen partiellen Differentialgleichung (PDE) charakterisieren.

Zur Bestimmung einer numerischen Lösung dieser PDE verwenden wir eine finite Differenzen Approximation des Differentialoperators, die dann auf ein Gleichungssystem für die Gitterwerte der Verrückung führt. Die konkrete Diskretisierung der Differentialgleichung ist jedoch für das Registrierungsverfahren ohne Bedeutung.

Diese Vorgehensweise deckt sich mit dem Verfahren für die ausschließlich auf dem Distanzkriterium und dem Glattheitskriterium basierende Methode. Der neue Aspekt besteht in einer geeigneten Einbindung der vorgegebenen Kontrollpunkte in die Berechnung der Verrückung, bei der eine Korrespondenz der Kontrollpunkte garantiert werden kann. Da bereits Verfahren zur Bestimmung der Verrückung auf der Basis des Distanz- und des Glattheitskriteriums bekannt sind, geben wir ein Verfahren an, welches Teillösungen in geeigneter Weise zu einer Gesamtlösung kombiniert, z.B. als

$$u_\ell(x) = v_\ell^0(x) + \sum_{j=1}^m \lambda_j^\ell v_\ell^j(x), \quad x \in \Omega, \quad \ell = 1, \dots, d.$$

Bezeichnet A den zum Glattheitsterm gehörigen Differentialoperator und f das zum Distanzkriterium gehörige Kraftfeld, dann ist v^0 eine numerische Lösung von $Av^0 = -f$, die Funktionen v^j sind numerische Lösungen der distributionellen PDE $Av^j = \delta^j$, $j = 1, \dots, m$ wobei δ^j das Punktauswertefunktional (Dirac-Stoß) lokalisiert am Kontrollpunkt $K^{T,j}$ bezeichnet. Die konkrete numerische Methode für die Lösung der PDE ist für das Registrierungsverfahren unerheblich.

Aus mathematischer Sicht sind die v^j , $j = 1, \dots, m$, Greensche Funktionen des Differentialoperators A , die eine Lösung der PDE bei vorgegebener Einzelpunktverrückung darstellen. Eine geeignete Linearkombination dieser Greenschen Funktionen stellt daher sicher, dass bei dem Gesamtverfahren alle Kontrollpunkte wie gefordert aufeinander abgebildet werden.

Die Funktion v^0 wird über ein iteratives Verfahren so bestimmt, dass das Distanzkriterium unter Einhaltung der geforderten Glattheit minimiert wird. Die Gewichtsfaktoren λ_j^ℓ werden dabei so angepasst, dass die Kontrollpunkte in der geforderten Weise abgebildet werden.

Die Initialisierung des Programms erfordert die Wahl eines Distanz- und eines Glattheitskriteriums bzw. der aus diesen Kriterien ableitbaren Kraft und des Differentialoperators. Auf der Basis der an den Kontrollpunkten lokalisierten Punktauswertefunktio-

nale können dann die Greenschen Funktionen $v^j, j = 1, \dots, m$ mit einem numerischen Verfahren bestimmt werden. Diese werden im weiteren Verlauf des Verfahrens nicht mehr geändert.

Der erfindungsgemäßen Initialisierung folgt eine gängige Iterationsprozedur, in deren Verlauf ein Gradientenabstieg unter Berücksichtigung der Kontrollpunkte durchgeführt wird. Menschliches Eingreifen ist nicht von Nöten. Das beschriebene Verfahren kombiniert also die Vorteile der auf Distanzkriterien basierenden Methoden (also insbesondere die Automatisierbarkeit und eine im Mittel optimale Registrierung) mit denen des Kontrollpunktverfahrens (garantierte Registrierung ausgezeichneter Punkte) und liefert bei Vorgabe eines initialen Satzes von Kontrollpunkten reproduzierbare, optimale Ergebnisse unabhängig vom Anwender bzw. Computerprogramm. Die Details des Computercodes spielen für das Endergebnis der Bildregistrierung keine wesentliche Rolle und beeinflussen nur die benötigte Rechenzeit und die Speicheranforderungen.

Bei den zu registrierenden Bildern kann es sich um digitale Bilder, Pixel, JPEG, wavelet basierte Objekte oder akustische Signale handeln.

Die in dem Verfahren auftretenden linearen Gleichungssysteme können direkt, indirekt, iterativ oder mittels Multigrid gelöst werden und es kann für das Verfahren ein Referenzkoordinatensystem verwendet werden, das durch Euler- bzw. Lagrange-Koordinaten abgebildet wird.

Im übrigen schlägt die Erfindung vor ein-, zwei- oder drei-dimensionale sowie Sequenzen von ein-, zwei- und drei-dimensionalen Objekten zu registrieren, und Kontrollpunkte zu verwenden, die anatomische Landmarken, fiducial marker oder andere charakteristische Kenngrößen sind.

Als Distanzkriterium wird ein solches vorgeschlagen, daß auf Intensitäts-, Kanten-, Ecken-, Oberflächennormalen- oder Level-Set basiert oder auf der ‚Sum of Squared Differences‘, L_2 -Distanz, Korrelation, Varianten der Korrelation, Mutual-Information oder Varianten der Mutual-Information beruht.

Die dem Distanzmaß assoziierten Kraftterme sollten über Finite-Differenzen-Verfahren oder Gradientenbildung berechnet werden und das verwendete Glattheitskriterium über ein elastisches Potential oder einen fluidalen Ansatz physikalisch motiviert sein oder

über Diffusive oder Curvature-Ansätze auf zeitlichen oder räumlichen Ableitungen der Verrückung basieren.

Die Randbedingungen des Differentialoperators sollten vorteilhafterweise über explizite oder implizite, Neumann-, Dirichlet-, sliding-, bending- oder periodische Randbedingungen gegeben sein.

Die Art der Diskretisierung des Differentialoperators sollte auf finiten Differenzen, finiten Volumen, finiten Elementen, Fourier-Methoden, Reihenentwicklung, Filtertechniken, Kollokationen oder Multigrid beruhen und die Interpolation d -dimensional über Splines oder Wavelets durchgeführt werden.

Schließlich kann die Verrückung explizit über das Inkrement der Verrückung oder deren Zeitableitung aufdatiert werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Registrierung von Bildern durch iterative Bestimmung einer hinsichtlich eines vorgegebenen Distanz- und Glattheitskriteriums optimalen Transformation, **durch gekennzeichnet, dass**

in den Bildern korrespondierende Kontrollpunkte garantierbar aufeinander abgebildet werden, durch

- (1) Initialisieren eines Iterationszählers und des initialen Verrückungsfeldes,
- (2) Bestimmen der numerischen Lösungen der nicht-linearen partiellen Differentialgleichung (PDE) mit dem aus einem vorgegebenen Glattheitskriterium ableitbarem Differentialoperator und den an vorgegebenen Kontrollpunkten lokalisierten Punktauswertefunktionalen,
- (3) Zusammenfassen der Interpolationsbedingungen,
- (4) Berechnen einer speziellen numerischen Lösung der PDE mit der auf der Basis des Distanzkriteriums und des aktuellen Verrückungsfeldes bestimmten Kraft und dem aus dem Glattheitskriterium abgeleiteten Differentialoperator,
- (5) Auswerten der speziellen Lösung an den Kontrollpunkten,
- (6) Bestimmen der Koeffizienten zur Berechnung einer aktualisierten Verrückung,
- (7) Aufdatieren des Verrückungsfelds und Erhöhen des Iterationszählers,
- (8) Überprüfen der Verrückung auf Konvergenz und
- (9) bei Nichterfüllen des Konvergenzkriteriums erneuter Durchlauf der Schritte (4) bis (8).

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass ein- zwei- oder dreidimensionale sowie Sequenzen von ein-, zwei- und drei-dimensionalen Objekten registriert werden.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Kontrollpunkte anatomische Landmarken, fiducial marker oder andere charakteristische Kenngrößen sind.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Distanzkriterium Intensitäts-, Kanten-, Ecken-, Oberflächennormalen- oder Level-Set basiert oder auf der Sum of Squared Differences, L_2 -Distanz, Korrelation, Varianten der Korrelation, Mutual-Information oder Varianten der Mutual-Information beruht.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die dem Distanzmaß assoziierten Kraftterme über Finite-Differenzen-Verfahren oder Gradientenbildung berechnet werden.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das verwendete Glattheitskriterium über ein elastisches Potential oder einen fluidalen Ansatz physikalisch motiviert oder über Diffusive oder Curvature-Ansätze auf zeitlichen oder räumlichen Ableitungen der Verrückung basiert.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Randbedingungen des Differentialoperators explizite oder implizite, Neumann-, Dirichlet-, sliding-, bending- oder periodische Randbedingungen sind.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Art der Diskretisierung des Differentialoperators auf finiten Differenzen, finiten Volumen, finiten Elementen, Fourier-Methoden, Reihenentwicklung, Filtertechniken, Kollokationen oder Multigrid beruht.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Interpolation d -dimensional über Splines oder Wavelets durchgeführt wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Verrückung explizit über das Inkrement der Verrückung oder deren Zeitableitung aufdatiert wird.

